Evolución de las Descargas Parciales y su Incidencia en el Deterioro y Fallo de los Aislamientos Sólidos de las Barras Estatóricas de los Hidrogeneradores de EEPPM

Juan Carlos Toro Londoño; Héctor González / EEPPM, Colombia
jtorol@eeppm.com • hgonzale@eeppm.com

Trabajo destacado entre los presentados en el Seminario Internacional sobre Mantenimiento y Servicios Asociados en Sistemas Eléctricos - SIMSE 2003, realizado en Cartagena de Indias, Colombia, del 10 al 13 de agosto de 2003

Índice

1. Introducción
2. Implementación del Laboratorio
3. Experimentos
4. Resultados
5. Referencias

Resumen

La medición de las DP es una prueba de tipo y rutina, y es efectuada sobre equipos (bobinas) que tienen un aislamiento interno cuyas características pueden sufrir un rápido envejecimiento debido a la presencia de DP. La evolución de señales de DP es un síntoma de que el aislamiento se ha degradado y está próximo a la falla.

El objetivo de la investigación obedece a responder la siguiente pregunta: **¿Pueden ser las DP una muestra real del estado de deterioro del aislamiento en los devanados de una máquina eléctrica, al punto que el análisis de su evolución pueda definirse como índice de deterioro o no del mismo?**.

Una vez resuelta esta pregunta se pretende determinar el tipo y alcance del mantenimiento a realizar. Para cumplir con este objetivo, se plantea utilizar, como método de obtención de las señales de DP, el uso de analizadores multicanales, empleando dos tecnologías: la italiana (con el equipo Scapar como representante) y la canadiense (con el PDA IV Lite).

Se emplea como marco de referencia y punto de partida para el planteamiento del problema, el uso de la historia de operación, ciclos de carga y ensayos no destructivos en generadores hidráulicos sincrónicos, y la importancia y el lucro cesante originado por la salida intempestiva de una unidad de generación, ocasionada por una falla en el aislamiento en las barras que conforman el devanado de armadura de un hidrogenerador.

Fue indispensable, la implementación del laboratorio de DP, que se realizó con el fin de caracterizar los sistemas de aislamiento sólido utilizados en las bobinas y barras que conforman los devanados de armadura de los hidrogeneradores instalados en las EEPPM y así establecer la vida útil de estos devanados a partir del análisis de las DP y de su incidencia en los procesos de degradación presentes en los aislamientos, utilizando procedimientos de envejecimiento prematuro, implementado para ello condiciones extremas de temperatura, tensión, frecuencia y vibraciones, entre otras.

A partir de la implementación de los experimentos y de la norma IEEE 1043 (Soportabilidad de Tensión), se establecen las estrechas relaciones existentes entre la prueba de DP y pruebas como el factor de potencia, Tip-Up, resistencia de aislamiento y resistencia superficial o perimetral, empleado Despliegues de Amplitudes de Descargas Parciales (DADP) y contrarrestándolos con las información recogida a partir de la aplicación de las pruebas antes nombradas.

Los ensayos realizados permitieron entre otras conclusiones:

- La posibilidad de detectar la degradación del aislamiento independientemente del mecanismo de degradación, a través del estudio evolutivo de las DP.
- El envejecimiento del dieléctrico sólido por alta frecuencia a temperatura ambiente, constituye un método eficaz para la evaluación de la vida útil residual, en el mediano plazo. El ensayo combinado a 8 KV, 800 Hz y 180°C, realizado para estimar la vida útil residual de un aislamiento sólido constituye el método más efectivo para degradar aceleradamente el aislamiento y estimar su vida útil residual.
- La determinación de la temperatura como el mecanismo más agresivo para los aislamientos similares a los bajo estudio.
- Corroborar, que mediante el empleo de esta técnica es factible identificar el tipo de deterioro que posee el aislamiento y la evolución del defecto en el tiempo.
- La importancia de no realizar mediciones de DP sin antes excitar el devanado, al menos durante 24 horas, con el objetivo de evitar malas interpretaciones en las mediciones debido a la variación de la resistencia superficial de las paredes del dieléctrico.

1. Introducción

La implementación del laboratorio de descargas parciales se realizó con el fin de caracterizar los sistemas de aislamiento sólido utilizados en las bobinas y barras que conforman los devanados de armadura de los hidrogeneradores instalados en las Empresas Públicas de Medellín E. S. P. y así establecer la vida útil de estos devanados a partir del análisis de las descargas parciales y de su incidencia en los procesos de degradación presentes en los aislamientos, utilizando procedimientos de envejecimiento prematuro, implementado para ello condiciones extremas de temperatura, tensión, frecuencia y vibración, entre otras.

La medición de las Descargas Parciales (DP) es una prueba de tipo y rutina, y es efectuada sobre equipos (bobinas) que tienen un aislamiento interno cuyas características pueden sufrir un rápido envejecimiento debido a la presencia de descargas parciales.

Mediante el monitoreo de señales y registro de mediciones se determina el estado del sistema aislante con la ayuda de equipos reveladores multicanales que realizan el Despliegue de Amplitudes de Descargas Parciales (DADP).

Estas mediciones y registros son del tipo no destructivo y no intervienen en el proceso de envejecimiento prematuro, mediciones y registros tales como: tensión, temperatura, frecuencia, pulsaciones y fuerza aplicada, además de las condiciones ambientales bajo las cuales son efectuadas las pruebas (temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica). La evolución de señales de descargas parciales es un síntoma de que el aislamiento se ha degradado y está a próximo a la falla.

Para la realización de las investigaciones fue necesario implementar un laboratorio, dotado con los equipos necesarios para la implementación de pruebas de envejecimiento prematuro.

2. Implementación del Laboratorio

El laboratorio está ubicado en la central Hidroeléctrica La Ayurá de propiedad de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P, en el municipio de Envigado, departamento de Antioquia. Allí se ha distribuido el equipo de alta tensión, las jaulas de prueba y filtro de ruido, el equipo de alta frecuencia, la fuente vibratoria y los sistemas electrónicos para el monitoreo continuo de las señales a controlar (tensión, frecuencia, fuerza aplicada, temperatura, humedad relativa).

Se cuenta con los siguientes equipos e infraestructura:

La Jaula para Ensayos: Se usa para alojar las probetas y barras que serán sometidas a las pruebas de alta tensión y envejecimiento prematuro. Se emplea como sistema de apantallamiento eléctrico.

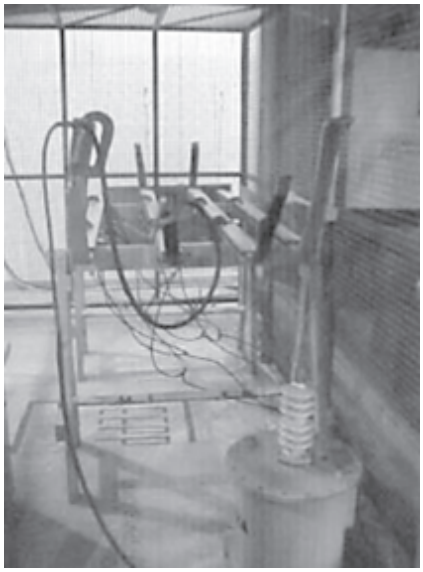

Figura 2. Jaula de ensayos y pruebas.

Figura1. Vista General del Laboratorio.

Fig. 3 Contenedor con el equipo de Alta Tensión.

Fig. 4 Falla de una barra bajo prueba de Alta Tensión.

Equipo de Alta tensión: dotado de sus protecciones acometida, consola de mando y medida contactores a 220 V alimentado desde el edificio, con un transformador libre de descargas parciales 380 / 32000 V de 155 KVA.

Para alimentar las barras o probetas el equipo dispone de un cable de alta tensión, en poliuretano reticulado de alta densidad aislado a 34 kV y libre de descargas parciales.

Jaula de Procesamiento: Debido a que durante la ejecución de las pruebas se pueden presentar campos electromagnéticos que causarían disturbios en la medida, se optó por utilizar una jaula de Faraday. Se emplea como apantallamiento del ruido eléctrico debido a la gran sensibilidad de medida requerida en los ensayos. La jaula contiene los equipos reveladores de descargas parciales, Scapar (Ansaldo), PDA IV Lite (Iris Power) interconectados a través de una fibra óptica que sirve de aislamiento galvánico entre los equipos reveladores de DP y su correspondiente PC.

Mediante el protocolo de comunicación RS232 los PC cuentan con el software necesario para el despliegue de la Distribución de Amplitudes de Descargas Parciales, las cuales se presentan en formato 2D y 3D, discriminando la polaridad de los pulsos, magnitud y cantidad.

Equipos Reveladores de Descargas Parciales: Se entiende por descargas parciales el cortocircuito de una pequeña fracción de aislamiento interno (burbuja) que ocurre bajo condiciones normales de operación a frecuencia industrial. La energía debida a tales descargas puede perjudicar la vida del aislamiento mismo. Es posible medir la carga eléctrica causada por el cortocircuito de la burbuja debido a que generan impulsos de voltaje repetitivos de alta frecuencia que pueden ser descubiertos por amplificadores electrónicos de características adecuadas. Los equipos usados en el laboratorio son analizadores de amplitudes de descargas parciales multicanales de dos tecnologías a saber: italiana (el SCAPAR) y Canadiense (PDA IV LITE). El ancho de banda de los equipos está entre 100 KHZ y 100 MHz y tienen posibilidad de medir el valor de carga aparente con la sensibilidad de 0.1 pC.

Condensador de Acoplamiento: de 125 pF, y 25 KVr.m.s. se comporta como un filtro paso alto, es con este condensador que se capturan las señales de DP.

Generador de Carga. Se usa para efectuar calibraciones; la cual consiste en obtener una relación entre las descargas parciales generadas debidas al generador de carga y la indicación del instrumento de detección.

Transformador de Alta Frecuencia. Se empleará durante los ensayos de envejecimiento del polímero. Está dotado de un convertidor estático de frecuencia 800 Hz de 0 – 10000 voltios onda senoidal. El transformador con un potencia de 3 kVA

Fig. 5 Equipos Reveladores de DP.

alimentación 220 V AC 60 Hz monofásico tiene la capacidad de regular el voltaje de 0 a 10000 V_{AC}.

Sistema de Calentamiento de las Barras. Con el fin de ejecutar la prueba de soportabilidad de voltaje (Voltaje Endurence, Norma IEEE 1043), a las barras de prueba, se dispone de un sistema de calentamiento de barras, dotado de resistencias de calentamiento. El juego de resistencias van insertas en moldes metálicos con una carga de 6000 vatios por barra. El control de la temperatura se hará mediante el uso de sensores térmicos (RTD, termocuplas o sistema infrarrojo) y el controlador, el cual operará un actuador dotado de tiristores de potencia, con el fin de mantener la temperatura de prueba dentro del rango preestablecido.

Tarjeta y Sensores. Para la adquisición de señales, datos y control de las pruebas de envejecimiento prematuro. Se usa la tarjeta de adquisición de datos DAQP 208H QUATECH la cual recibe las señales provenientes de sensores de temperatura, humedad, transferencia de calor y las señales de voltaje, frecuencia y corriente trifásica y las elabora convenientemente a fin de presentar los despliegues gráficos históricos de las variables de prueba.

Transformador de Aislamiento. Con el fin de establecer el aislamiento adecuado entre la tensión de prueba y el voltaje de la red en caso de falla de la barra, se dispone de un transformador de aislamiento de relación 220/220 V, tipo seco y potencia nominal 24 KVA.

Sensor de Humedad y Temperatura (HX94). Para censar cuenta con una película delgada de polímero de material capacitivo a través del cual se censa la humedad relativa tomando lecturas entre 3% y 95 %, en el caso de la temperatura, el sensor cuenta con una delgada película de RTD de 100 Ohm en platino capaz de censar en el rango entre los 0 y los 100 °C (32°F -212°F). En las señales de salida pueden leerse corrientes en el orden de 4 a 20 mA o en su defecto voltajes del orden de 0 a 1 voltio.

Probetas de Envejecimiento. Con el fin de adelantar la investigación referente a los mecanismos de degradación del sistema aislante usado (polímero), se cuenta con probetas vaciadas con resina epoxídica mediante preparación de los dos componentes que reaccionan por termoendurecimiento y que son mezclados en la relación 2 a 1. Las probetas son curadas durante un periodo de tiempo no inferior a 24 horas, tiempo al final del cual la resina ha adquirido consistencia y es sometida a pruebas. Para fabricar la probeta, el polímero se vierte en un molde especialmente diseñado, con el fin de simular una cavidad gaseosa englobada en el sistema aislante.

Mediante el uso de esta probeta se podrá inferir sobre el comportamiento del aislamiento sometido a un campo eléctrico intenso en presencia de una cavidad gaseosa englobada en el medio dieléctrico.

Fuente Vibratoria. Es un prototipo diseñado para simular las mismas condiciones reales de las barras estatóricas de los grandes generadores sincrónicos intentando recrear las vibraciones a las cuales las barras están sometidas a la salida del estator, esta se compone esencialmente de una unidad hidráulica y de un sistema de control electrónico que se encarga de enviar y modular los pulsos eléctricos a la servo válvula. El elemento fundamental de la fuente vibratoria, sin duda alguna, es la servo válvula. Esta se encarga de controlar el movimiento del pistón que choca contra la barra estatórica de pruebas, simulando un efecto de vibración. En realidad lo que se genera es un movimiento pulsatorio concentrado en un solo punto lo que se traduce en vibración a lo largo de toda la barra.

Fig. 6 Probeta con resina epóxica sometida a proceso de vacío y presión.

Fig. 7 Vista General de la Fuente Vibratoria.

3. Experimentos

Para lograr evaluar la acción de las diferentes mecanismos de degradación que se implementaron para evaluar su incidencia en el deterioro y falla de los aislamientos sólidos empleados en las barras de los generadores 1 y 2 de la central hidroeléctrica Guatapé.

Las relaciones temporales se reducen a relaciones de frecuencia, por lo tanto en teoría, es factible pensar en acelerar el proceso de envejecimiento de un aislamiento mediante la aplicación de alta frecuencia con el fin de predecir la vida útil residual, sin necesidad de someter a frecuencia industrial durante largos períodos de tiempo, las muestras bajo ensayo.

Los ensayos fueron realizados sobre material homogéneo (resina epoxídica) y sobre material compuesto (barras de generador), estos fueron:

Ensayo 1. Polímero, Tensión 10 Kv, 60 Hz, Temperatura Ambiente.

Ensayo 2. Polímero, Tensión 8 Kv, 800 Hz, Temperatura Ambiente.

Ensayo 3. Polímero, Tensión 8 Kv, 60 Hz, Alta temperatura.

Ensayo 4. Polímero, Tensión 8 Kv, 800 Hz, Alta temperatura. Experimentos a Barras Estatóricas.

Ensayo 5. Barra Nueva NEC, Tensión 16 Kv, 60 Hz, Temperatura Ambiente.

Ensayo 6. Barra Nueva NEC, Tensión 8 Kv, 800 Hz, Temperatura Ambiente.

Ensayo 7. Barra Nueva NEC, Tensión 10 Kv, 60 Hz, Alta Temperatura.

Ensayo 8. Barra Nueva NEC, Tensión 8 Kv, 800 Hz, Alta Temperatura.

Ensayo 9. Barra Nueva Mitsubishi, Tensión 8 Kv, 800 Hz, Temperatura Ambiente.

Ensayo 10. Barra Nueva Mitsubishi, Tensión 8 Kv, 60 Hz, Temperatura Ambiente.

Ensayo 11. Barra Usada, Tensión 16 Kv, 60 Hz, Temperatura Ambiente.

Ensayo 12. Barra Usada, Tensión 8 Kv, 800 Hz, Temperatura Ambiente.

Ensayo 13. Barra Usada, Tensión 8 Kv, 800 Hz, Alta Temperatura.

Ensayo 14. Ataque Químico al Aislamiento.

Ensayo 15. Pruebas a una Formilla de Barras.

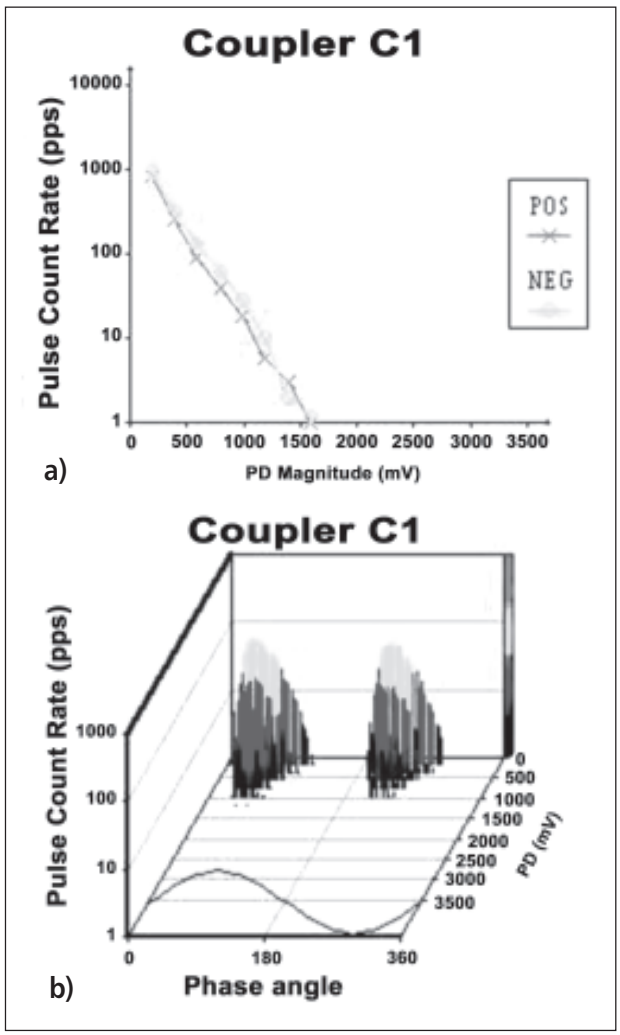

Figura 8. Despliegues de Amplitud de DP con el equipo PDA IV Lite. a) En dos dimensiones. b) En tres dimensiones.

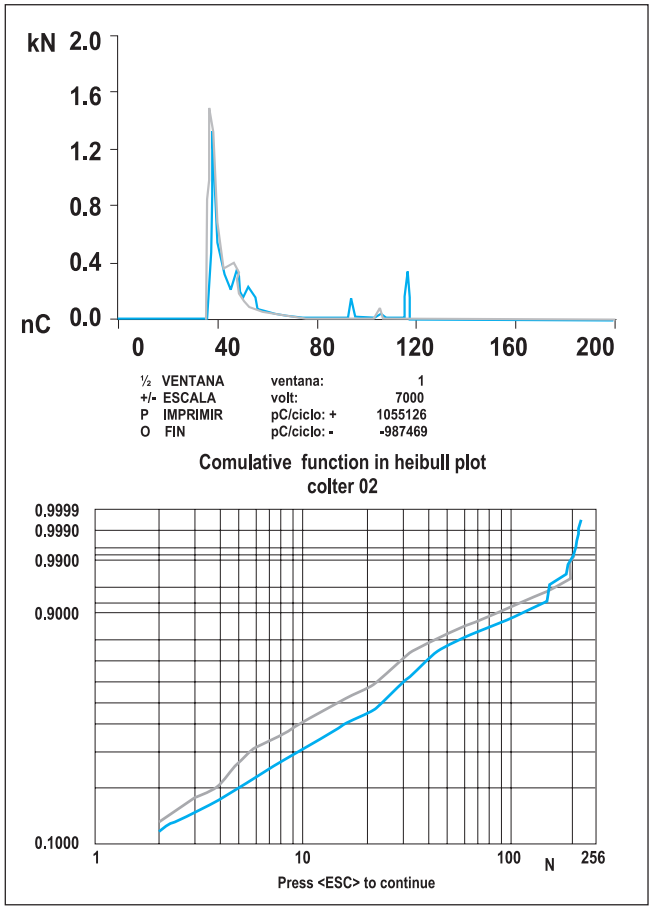

Figura 9. a) Despliegues de Amplitud de DP con el equipo SCAPAR. b) DADP de una barra durante el proceso final de envejecimiento reportado en un plano de Weibull

4. Resultados

- Los ensayos permiten corroborar, que mediante el empleo de esta técnica es factible identificar el tipo de deterioro que posee el aislamiento y la evolución del defecto en el tiempo.
- La distribución de amplitud de las descargas parciales, y sobre todo su forma, es capaz de caracterizar el estado de envejecimiento, o bien las condiciones del sistema aislantes examinado.
- Conforme a lo que se ha mostrado por medio del análisis de los resultados experimentales ilustrados anteriormente, la distribución obtenida sobre un sistema aislante en una condición preestablecida, puede considerarse, para el sistema aislante, como una "huella digital" capaz de caracterizarlo por lo que concierne a los procesos de descargas parciales y a su envejecimiento. Por lo tanto, por medio de la comparación entre los DADP adquiridos con los equipos usados (Scapar y PDA IV LITE), en tiempos distintos, es posible evidenciar cualquier variación presente en el sistema aislante bajo prueba, causada por los procesos de degradación ocasionados mediante las solicitaciones eléctricas, térmicas, mecánicas y ambientales.
- Los ensayos permiten deducir que las medidas puntuales de las descargas parciales en un devanado no permiten inferir resultados precisos, por lo tanto el mantenimiento preventivo en los devanados de las grandes máquinas sincrónicas, cobra validez con el seguimiento de la evolución de las descargas parciales en intervalos de tiempo y con el análisis de tendencias.
- Dado que la tensión es un factor predominante para la activación de las descargas parciales, las pruebas de descargas parciales no permiten detectar deterioro mecánico o térmico del sistema aislante en las barras localizadas cerca al neutro, ya que la tensión está por debajo de la tensión de ruptura. Por lo tanto con este sistema no es posible diagnosticar 100% el devanado.
- Se confirma a través de la investigación que la temperatura es el mecanismo de degradación más agresivo para los aislamientos sólidos y que es este parámetro el que requiere de mayor atención durante la operación de los devanados.
- Existe una estrecha relación entre la activación de las descargas parciales y la medida del factor de potencia y el Tip – Up.
- El envejecimiento del dieléctrico sólido por alta frecuencia a temperatura ambiente, constituye un método eficaz para la evaluación de la vida útil residual, en el mediano plazo.
- El ensayo combinado a 8 KV, 800 Hz y 180°C, realizado para estimar la vida útil residual de un aislamiento sólido constituye el método más efectivo para degradar aceleradamente el aislamiento y estimar su vida útil residual.
- La implementación del Laboratorio de descargas parciales se justifica debido al potencial que esta herramienta de diagnóstico representa para la estimación de la vida útil residual de los aislamientos sólidos existentes en los devanados de las grandes máquinas rotativas, como también para la evaluación de los diferentes tipos de polímeros existentes en el mercado.

5. Referencias

[1.] IEEE Recommended Practice for Measurement of Power – Factor Tip – Up of Rotating Machinery Stator Coil Insulation, IEEE Standard No. 286, Julio de 1975.

[2.] IEEE Guide: Recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery, IEEE Standard No. 43, 2000. Revisión de la norma IEEE 43 de 1974.

[3.] TORO, Juan Carlos. En: SEMINARIO: "TECNOLOGÍA Y DIAGNÓSTICO DE AISLAMIENTO PARA GRANDES MÁQUINAS ROTATIVAS" (1°: 2000: Santiago de Cali). Memorias del I Seminario: "Tecnología y Diagnóstico de Aislamiento para Grandes Máquinas Rotativas". Santiago de Cali, 2000.

[4.] OMESGASCOPE, Manual de Usuario Handheld Infrared Thermometer. Stamford U.S.A. 2000.

[5.] OMESGASCOPE, Manual de Usuario HX SS RH Probe. Stamford U.S.A. 2000.

[6.] IEEE, DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION SOCIETY Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Agosto de 1995. Vol. 2 Número 4.

[7.] IEEE, Guía Técnica Normalizada para la Medida de las Descargas Parciales en Máquinas Rotativas. IEEE Std. 1439-1999.

[8.] IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide. Test Procedures For Synchronous Machine. Part I Acceptance and Performance testing. IEEE Std. 115-1995. pp. 5-7.